

УДК 621.313.333

НАСТРОЙКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЫ ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ

В.И. Смолин, В.А. Яковлев, Е.В. Литвинова

Решается задача повышения точности математической модели индукционной машины системы управления асинхронного электропривода. В качестве эталонной модели электрической машины выбрана система уравнений мгновенного баланса активной, реактивной мощности и приведенной механической нагрузки. В работе рассматривается схемный вариант энергетической модели. Параметры L, R элементов энергетической модели определяются поиском экстремума уравнения невязок между расчетными значениями электрических величин и данными испытаний индукционной машины в режиме холостого хода и номинальном режиме.

Ключевые слова: индукционная машина, математическая модель оптимизация параметров.

В системах управления электроприводом с эталонной моделью электрической машины (MRAS-системах [1]) предъявляются повышенные требования к точности настройки математической модели. Первичная база данных каталога или испытаний, как правило, недостаточна для идентификации внутренних параметров статора и ротора электрических машин. Возникает необходимость поиска компромиссного решения, удовлетворяющего требованиям оптимального соответствия параметров математической модели техническим данным электрической машины. В работе рассмотрены вопросы настройки энергетической модели индукционной машины по данным испытаний в режимах холостого хода и номинальной нагрузки.

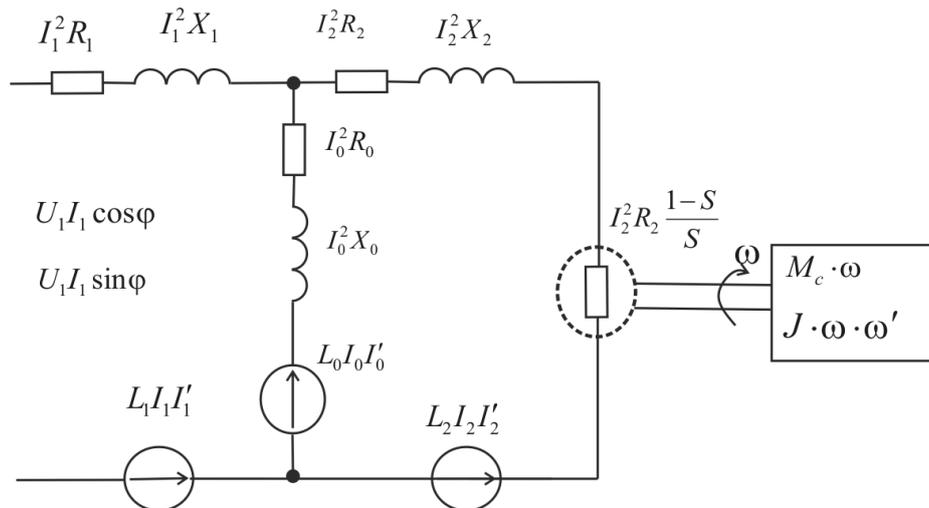
В качестве математической модели индукционной машины принята система уравнений мгновенного баланса активной, реактивной мощности и приведенной механической нагрузки [2, 3]. Схемный вариант модели, представлен на рис.

Обобщенные токи и напряжения модели взаимосвязаны с амплитудами I_{1m}, U_{1m} первых гармоник трехфазной системы индукционной машины:

$$I_1^2 = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 = 1,5I_{1m}^2; \quad U_1^2 = u_{AN}^2 + u_{BN}^2 + u_{CN}^2 = 1,5U_{1m}^2. \quad (1)$$

Аналогичные зависимости справедливы для токов I_0 и I_2 ветви намагничивания и ротора. Энергия магнитных полей $W_i = L_i I_i^2 / 2$ развивает в переходных режимах активную мощность:

$$\sum P_{Li} = L_0 I_0 \frac{dI_0}{dt} + L_1 I_1 \frac{dI_1}{dt} + L_2 I_2 \frac{dI_2}{dt}. \quad (2)$$



Аналоговая энергетическая модель индукционной машины: индексы приведения параметров статора к ротору опущены, штрихом отмечены производные обобщенных токов, $S=(\omega_0-\omega)/\omega_0$ – скольжение ротора, ω_0 – синхронная частота

При настройке модели динамические составляющие мощности обнуляются. Цель настройки заключается в определении внутренних параметров $R_0, x_0, R_1, x_1, R_2, x_2$ электромагнитной системы индукционной машины, оптимально соответствующих данным испытаний.

Данные испытания индукционной машины в режиме холостого хода представим в виде массива $(R_1, \omega_0, U_{1н}, I_{10}, \cos\varphi_{10})$. Эти данные позволяют определить грубые значения параметров ветви намагничивания:

$$R_{0*} = \frac{U_{1н} \cos\varphi_{10}}{I_{10}}, \quad x_{0*} = \frac{U_{1н} \sin\varphi_{10}}{I_{10}}. \quad (3)$$

Учитывая типовые соотношения между индуктивностью рассеивания L_1 и намагничивания L_0 статора в зависимости от номинальной мощности $L_0/L_1 = 10 \dots 50$ [4], выберем грубые значения индуктивных сопротивлений $x_{1*} = \omega_0 L_{1*}, x_{2*} = \omega_0 L_{2*}$ и $x_{2*} = \omega_0 L_{2*}, x_{1*} \approx x_{2*}$

Данные испытаний индукционной машины в номинальном режиме представим в виде массива $(R_1(70^\circ), \omega_0, I_{1н}, U_{1н}, \cos\varphi_{1н}, S_н, M_н)$.

Тогда номинальная мощность и КПД индукционной машины:

$$P_н = M_н(1 - S_н)\omega_0, \quad \eta_н = \frac{P_н}{U_{1н} I_{1н} \cos\varphi_{1н}}. \quad (4)$$

А грубое значение сопротивления ротора:

$$R_{2*} = \frac{S_н P_н}{(1 - S_н)(I_{1н}^2 - I_{10}^2)}. \quad (5)$$

Выберем исходные данные для расчета энергетической модели: $(\omega_0, U_{1н}, S_н, R_{0*}, x_{0*}, R_1(70^\circ), x_{1*}, R_{2*}, x_{2*})$. Применяв какой-либо метод расчета модели (табл. 1), вычислим грубые значения электрических величин $(I_{1н}^*, \cos^*_{1н}, \eta^*_{1н}, P^*_{1н})$. В качестве основного инструмента оптимизации выберем уравнение невязок:

$$\left(\frac{I_{1H}^* - I_{1H}}{I_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{\cos\varphi_{1H}^* - \cos\varphi_{1H}}{\cos\varphi_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_H^* - \eta_H}{\eta_H}\right)^2 + \left(\frac{P_H^* - P_H}{P_H}\right)^2 = \min. \quad (6)$$

Применив один из методов поиска экстремума уравнения (6), решим вариационную задачу определения оптимальных значений параметров модели $R_0, x_0, x_1, x_2, R_1(70^\circ), R_2$. Уравнение невязок может содержать несколько экстремумов. Выбранное решение не должно противоречить физическим основам электромагнитной системы индукционной машины.

Рассмотрим конкретный пример применения данной методики. Требуется оптимизировать параметры математической модели (табл. 2) по данным испытаний асинхронного двигателя AD4A280M2Y2 ($U_{1H}=660$ В, $\omega_0=314$ рад/с $R_1=0,55$ Ом, $I_{10}=35$ А, $\cos\varphi_{10}=0,27$)₀ и ($U_{1H}=660$ В, $I_{1H}=246,3$ А, $\cos\varphi_{1H}=0,89$, $\eta_H=0,915$, $S_H=0,018$, $\omega_0=314$ рад/с, $P_H=132$ кВт)_H.

Таблица 1

Параметры энергетической модели

Параметр	R_0 , Ом	x_0 , Ом	R_1 , Ом	x_1 , Ом	R_2 , Ом	x_2 , Ом
Грубая настройка	4,84	17,1	0,055	0,45	0,043	0,46
Оптимальная настройка	5,08	17,95	0,058	0,413	0,046	0,423

Таблица 2

Погрешность модели по базовым показателям

Показатель		I_{1H}	$\cos\varphi_{1H}$	P_H	η_H	M_H
Отклонение, %	Грубая настройка	7,38	0,112	8,64	0,874	8,63
	Оптимальная настройка	0,041	2,81	0,303	2,51	0,304

Математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U_1 I_1 \cos\varphi_1 - I_1 R_1 - \sum P_{L_i} \\ U_1 I_1 \sin\varphi_1 - I_1^2 x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & R_2/S \\ x_0 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0^2 \\ I_2^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_{эм} \cdot \omega = \frac{I_2^2 R_2 (1-S)}{S} = \omega \left(M_C + J \frac{d\omega}{dt} \right), \quad (8)$$

где $M_{эм}$ и M_C – электромагнитный момент индукционной машины и момент сил сопротивления нагрузки, J – момент инерции нагрузки. Информационно-измерительная система тягового электропривода с энергетическим методом управления [5, 6] обеспечивает прямое вычисление переменных левой части уравнения (7). Данный фактор создает условия для отдельного управления состоянием электромагнитной системы по току намагничивания I_0 и моментом $M_{эм}$ по току ротора I_2 .

Библиографический список

1. Peter Vas. Sensor less vector and direct torque control. Oxford New York Tokyo, Oxford University Press, 1998. – 729с.

2. V.I. Smolin, I.G. Topolskaya, “Amplitude control of the moment of a three-phase asynchronous drive based on generalized energy-flow principles”, Russian Electrical Engineering, 2014, vol. 85, no.4, pp. 205–209.

3. Смолин, В.И. Теория обобщенного энергопотока трехфазных электротехнических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – № 1. – С. 13

4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Далаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

5. Smolin, V.I., Topolskaya, I.G., & Volovich, G.I. “The energy method for monitoring the instantaneous state and the formation of a synchronous motor control variables,” Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2016, doi:10.1109/ICIEAM.2016.7911509.

6. Smolin, V., Topolskaya, I., and Gladyshev, S., “Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor”, SAE Technical Paper 2018-01-0766, 2018, URL: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0766>.

[К содержанию](#)